



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of some Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/21663>

**Official URL:** [https://www.unitheque.com/Livre/presses\\_des\\_mines/Sciences\\_de\\_la\\_matiere/Modelisation\\_du\\_contact\\_et\\_de\\_l\\_usure-63246.html](https://www.unitheque.com/Livre/presses_des_mines/Sciences_de_la_matiere/Modelisation_du_contact_et_de_l_usure-63246.html)

### To cite this version:

Trajin, Baptiste and Obeid, Ziad and Régnier, Jérémie and Faucher, Jean and Maussion, Pascal Détection de dégradations et d'usures des roulements à billes d'un entraînement électrique. (2013) In: 22 ème édition des Journées internationales et francophones de tribologie, JIFT2010, 27 May 2010 - 28 May 2010 (Albi, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:

[tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

## Détection de l'usure des roulements à billes

27 et 28 mai 2010 – Albi – France

### **DETECTION DE DEGRADATIONS ET D'USURES DES ROULEMENTS A BILLES D'UN ENTRAINEMENT ELECTRIQUE**

### ***DETECTION OF ROLLING BEARING DAMAGE AND WEAR IN ELECTRIC DRIVES***

**B. Trajin<sup>1,2</sup>, Z. Obeid<sup>1,2,3</sup>, J. Regnier<sup>1,2</sup>, J. Faucher<sup>1,2</sup>, P. Maussion<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Université de Toulouse ; INP, UPS ; LAPLACE ; ENSEEIHT, BP 7122, F-31071 Toulouse Cedex 7

<sup>2</sup> CNRS ; LAPLACE ; BP 7122, F-31071 Toulouse Cedex 7

<sup>3</sup> TECHNOFAN ; BP 30053, F-31702 Blagnac Cedex

#### **Résumé**

Cet article traite de la détection de défauts de roulements dans les entraînements électromécaniques par analyse des courants d'alimentation des moteurs électriques. Les défaillances auxquelles nous nous intéressons concernent principalement les usures des surfaces de contact ainsi que la perte des propriétés lubrifiantes de la graisse des roulements. Nous mettons à profit certaines signatures fréquentielles des courants statoriques pour détecter les oscillations du couple de charge induites par les dégradations des roulements.

#### **Abstract**

*This paper deals with the detection of rolling bearing defects in electromechanical drives, using stator current analysis. The studied faults are, on the one hand induced by the wear of contact surfaces, on the other hand created by the loss of lubricant properties of bearing grease. Specific stator current spectral signatures are used to detect load torque oscillations induced by bearing faults.*

#### **1. INTRODUCTION**

Dans de nombreux domaines industriels, la surveillance et le diagnostic des systèmes occupent une place grandissante. En effet, en raison de la complexité accrue des systèmes électriques modernes, leurs coûts d'exploitation, essentiellement liés à la maintenance, se sont vus augmentés. La maintenance prédictive, basée sur des méthodes de détection et de diagnostic, vise à réduire les coûts de maintenance en planifiant et en réduisant le temps d'indisponibilité des systèmes [1]. Dans le contexte du diagnostic des systèmes, la détection des défauts mécaniques des machines électriques rotatives, et plus particulièrement des défauts de roulements, occupe une place prépondérante [2], [3].

Il est donc logique, d'un point de vue industriel et scientifique, de concentrer les efforts de détection des pannes sur le diagnostic des roulements à billes. De nombreuses méthodes ont vu le jour, essentiellement basées sur l'analyse des vibrations engendrées par les défaillances des roulements [4].

Compte tenu du fait que la mesure vibratoire peut représenter un surcoût non négligeable vis-à-vis du coût global du système, il est possible de baser le schéma de détection des défauts de roulements sur les courants statoriques des machines électriques [5].

Dans cet article, nous traiterons donc de la détection de défauts de roulements dans les machines électriques par analyse des courants statoriques. Nous étudierons deux systèmes différents. Le premier, dans le chapitre 2, est un entraînement à base de machine asynchrone. Nous analyserons alors un défaut de roulement dû à une usure par contamination des surfaces de contact internes. Nous proposerons alors un schéma de détection adapté. Dans le chapitre 3, nous étudierons les effets des propriétés lubrifiantes de la graisse des roulements à billes d'un ventilateur haute vitesse à base de machine synchrone dédié à l'aéronautique. Là encore, nous définirons et validerons un schéma de détection adapté.

## 2. DETECTION DE LA DEGRADATION DES SURFACES DE CONTACT D'UN ROULEMENT A BILLES

Dans cette partie, nous traiterons de la détection de défauts de roulements engendrés par usure des surfaces de contact. Nous procéderons tout d'abord à une analyse des grandeurs mécaniques en présence de défaut, puis nous exposerons les principes de détection par analyse des courants statoriques et enfin nous présenterons un indicateur permettant de statuer sur l'état de santé des roulements à billes.

### Description du banc de test et protocole expérimental

Le banc d'essais se compose d'une machine asynchrone triphasée à deux paires de pôles fonctionnant en moteur et d'une charge constituée d'une machine à courant continu. Les deux machines sont couplées par l'intermédiaire d'un couplemètre dynamique afin de mesurer le couple mécanique exercé sur l'arbre de rotation. Les roulements à billes de test équipant la machine asynchrone sont de type 6208 provenant du fabricant SKF. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

La machine asynchrone est alimentée par un onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) à fréquence variable fonctionnant en boucle ouverte. L'induit de la machine à courant continu est connecté à un banc de charge par l'intermédiaire d'un hacheur contrôlé en courant.

	Caractéristiques
Alésage externe	80mm
Alésage interne	40mm
Epaisseur	18mm
Nombre de billes	9

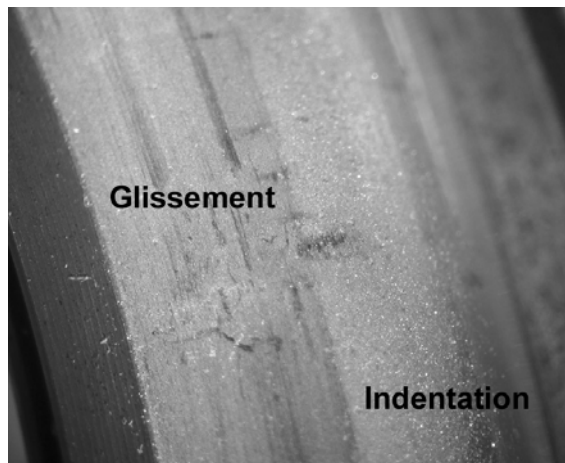
**Tab. 1** Caractéristiques principales des roulements 6208  
*Main characteristics of 6208-type rolling bearings*

Le couple mécanique et les trois courants de phases de la machine asynchrone sont mesurés par une carte d'acquisition NI4472. La carte est équipée de convertisseurs analogique-numérique ayant une résolution de 24bits et une dynamique de 20V. La fréquence d'échantillonnage de la carte est de 25,6kHz.

Au commencement de la campagne de dégradation, un roulement 6208 neuf est monté dans le palier avant de la machine asynchrone. Un trou est percé dans le palier avant de la machine et l'un des flasques du roulement est ôté de manière à pouvoir accéder à son cœur. Des mesures sont effectuées dans cette configuration pour constituer les mesures de référence. Par la suite, le roulement est contaminé, sans démontage, par ajout en son sein de poudre d'alumine (oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$ ) dont la dureté est supérieure à celle de l'acier des roulements [6]. L'opération est renouvelée plusieurs fois de suite. Chaque ajout de contaminant représente environ 150mg de poudre d'alumine. Les mesures après chaque ajout sont effectuées au bout d'une période de fonctionnement d'environ 20 minutes, pour

assurer la stabilisation thermique du roulement ainsi que la répartition volumique du contaminant. Le protocole complet d'usure est constitué de neuf ajouts de contaminant. Avant ajout de contaminant et après chaque ajout, dix enregistrements sont effectués afin de valider la reproductibilité des résultats.

Après le protocole complet d'usure, on remarque visuellement que la graisse du roulement est chargée de particules de contaminant ainsi que de particules métalliques arrachées aux surfaces de contact. Une vue microscopique de l'état de surface des bandes de roulement est disponible en figure 1. On constate que la surface de contact de la bague externe des marques d'indentation des particules d'alumine dans la bague de roulement réparties sur toute la circonférence du chemin de roulement, ainsi que des marques de glissement des billes sur la bague dans le sens du roulement. Par ailleurs, on peut constater que les deux phénomènes ne se produisent pas toujours au même angle de contact. En effet, l'usure prononcée se traduit également par une accentuation du jeu axial du roulement. Des traces d'indentation sont également constatées sur la bague interne et la cage.



**Fig. 1** Etat de surface de la bague externe après usure par contamination  
*Contact surface of the external ring after the wear process*

#### **Effets mécaniques et électriques des défauts de roulement**

Dans un roulement à une rangée de billes, des fréquences cinématiques sont associées à chaque élément du roulement, à savoir la bague externe ( $f_{be}$ ), la bague interne ( $f_{bi}$ ), les billes ( $f_{bille}$ ) et la cage ( $f_{cage}$ ). Dans les cas que nous considérons, le calcul de ces fréquences s'effectue en considérant la bague externe fixe et la bague interne en rotation à la fréquence  $f_r$ . Ces fréquences sont données analytiquement dans [7] (1), avec  $N_b$  le nombre de billes,  $D_b$  le diamètre des billes,  $D_p$  le diamètre moyen du roulement et  $\theta$  l'angle de contact.

$$\begin{aligned}
 f_{be} &= \frac{f_r}{2} N_b \left( 1 - \frac{D_b \cos(\Theta)}{D_p} \right) \\
 f_{be}^{\prime} &= f_r \frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{D_b \cos(\Theta)}{D_p} \right) \\
 f_{be}^{\prime\prime} &= f_r \frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{D_b \cos(\Theta)}{D_p} \right) \\
 f_{be}^{\prime\prime\prime} &= f_r \frac{N_b}{2} \left[ 1 - \left( \frac{D_b \cos(\Theta)}{D_p} \right)^2 \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

Lorsqu'un défaut apparaît sur un chemin de roulement, deux effets mécaniques peuvent être considérés en plus des vibrations mécaniques : une excentricité du roulement et des oscillations du couple de rotation. Il est démontré dans [8] que les phénomènes d'excentricité peuvent être négligés. Par ailleurs, expérimentalement, on constate l'apparition d'oscillations du couple de charge [8], [9], [10], dont les fréquences sont liées aux fréquences caractéristiques du roulement (1).

En présence d'oscillations du couple de charge, un modèle approché au premier harmonique de la machine asynchrone permet de montrer que des modulations de phase apparaissent sur les courants statoriques [11]. Ainsi, en cas de défauts de roulements, des harmoniques apparaissent sur les courants statoriques, avec comme fréquence  $f_s \pm f_{be}$  où  $f_s$  est la fréquence fondamentale des courants et  $f_{be}$  est une combinaison des fréquences caractéristiques du roulement défaillant et de  $f_r$  [12]. La figure 2 permet de visualiser, sur la densité spectrale de puissance (DSP) d'un courant statorique, les harmoniques engendrés par un défaut de roulement localisé sur la bague externe.

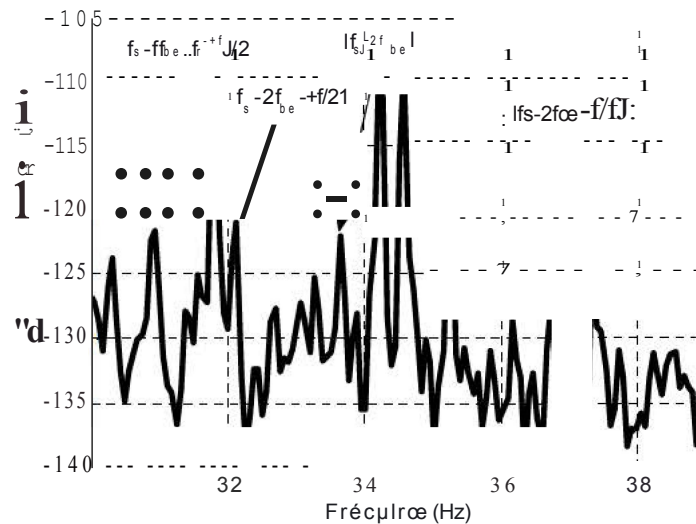


Fig. 2 Harmoniques de courant statorique en présence d'un défaut localisé sur la bague externe du roulement  
*Stator current harmonics in case of rolling bearing defect localised on the outer ring*

### Algorithme de détection des défauts de roulement par analyse des courants statoriques

La méthode de détection des défauts de roulements exploite les signatures latérales au fondamental d'alimentation. L'analyse proposée doit être capable de fournir un indicateur constitué d'une variable numérique simple, afin d'éviter le recours à l'expertise humaine. L'indicateur est alors comparé à une valeur obtenue lorsque la machine est équipée d'un roulement sain.

Sur un spectre de courant (voir figure 2), on identifie clairement les harmoniques relatifs au défaut de roulement. Cependant, l'apparition d'un harmonique particulier peut relever d'un processus aléatoire. L'algorithme proposé recherche, dans des bandes de fréquence, la possible apparition des harmoniques de défaut. Pour cela, l'énergie spectrale est utilisée. Les plages sélectionnées pour l'analyse sont spécifiées en (2). Ces plages représentent un bon compromis entre la complexité de calcul et la qualité des résultats [12]. Compte tenu des valeurs de  $n$ , il y a donc 30 plages fréquentielles dans lesquelles l'énergie est extraite : 15 plages pour lesquelles  $f_{def}=f_{be}$  et 15 plages telles que  $f_{def}=f_{bi}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} |f_s \pm [nf_{def} - f_c; nf_{def} + f_c]| \\ |f_s \pm [nf_{def} - f_r - f_c; nf_{def} - f_r + f_c]|, \quad n \in [1;5] \\ |f_s \pm [nf_{def} + f_r - f_c; nf_{def} + f_r + f_c]| \end{array} \right. \quad (2)$$

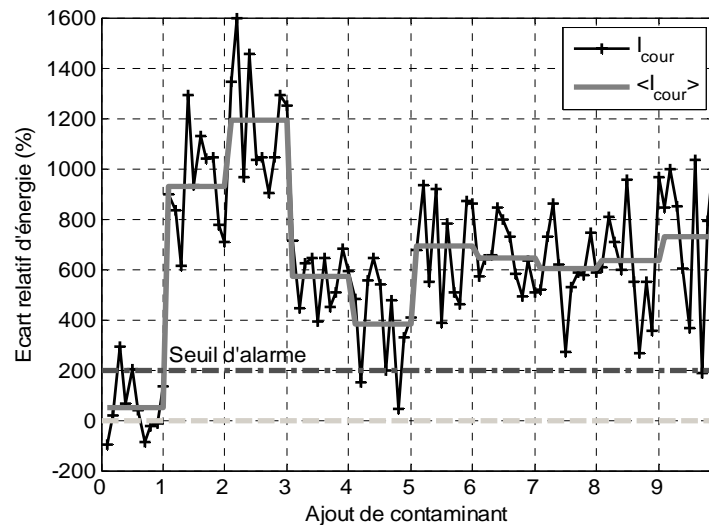
L'algorithme de détection des défauts de roulements est basé sur l'extraction d'énergie spectrale à partir du produit des densités spectrales de puissance de deux courants statoriques. Cette méthode permet de réduire la variance du bruit spectral et d'améliorer la qualité de la détection d'harmoniques [10]. La première étape de l'algorithme consiste en une estimation de  $f_r$ , à partir des harmoniques d'encoche présents sur les courants statoriques [13]. Les fréquences caractéristiques du roulement sont alors calculées pour le point de fonctionnement considéré. Les plages fréquentielles définies en (2) sont alors calculées. L'énergie spectrale est alors estimée par la somme des composantes spectrales dans les plages. Pour rendre l'indicateur peu dépendant du point de fonctionnement de l'entraînement, l'énergie de chaque plage est normalisée par l'énergie maximale dans celle-ci. Des énergies normalisées  $W_{norm}$  sont ainsi extraites dans chaque plage fréquentielle (3) avec  $P_{i1}(m)$  et  $P_{i2}(m)$  les DSP de deux courants statoriques.

$$W_{norm} = \frac{\sum_{m=m_1}^{m_2} P_{i1}(m)P_{i2}(m)}{\max_{m \in [m_1; m_2]} [P_{i1}(m)P_{i2}(m)]} \quad (3)$$

Les énergies mesurées sont comparées à des énergies de référence obtenues à l'aide de mesures effectuées sur la machine équipée d'un roulement sain avant de débiter le protocole d'usure. La comparaison se fait au moyen d'un écart relatif exprimé en %. L'indicateur final  $I_{cour}$  est obtenu par sommation de tous les écarts relatifs d'énergie [10].

### Résultats expérimentaux

Afin de profiter de la résonance électromécanique de l'entraînement asynchrone qui permet d'accroître la détectabilité des défauts de roulements [14], la fréquence fondamentale des courants statoriques est fixée à  $f_s=13.3Hz$ . La figure 3 donne les valeurs de  $I_{cour}$  ainsi que leur moyenne pour les dix enregistrements correspondant à chaque ajout de contaminant.



**Fig. 3** Valeurs de  $I_{cour}$  lors de l'usure d'un roulement par contamination  
 $I_{cour}$  values for the detection of bearing wear by contamination

On remarque sur la figure 3 que la détection de l'usure du roulement est assurée dès le premier ajout de contaminant, avec une probabilité assez faible de non détection, sauf pour les mesures correspondant à quatre ajouts de contaminant où des valeurs proches du cas sain apparaissent. A contrario, sans ajout de contaminant (indice 0 sur l'axe des abscisses), des valeurs d'indicateur relativement élevées apparaissent, pouvant provoquer une fausse alarme si un seuil de détection trop bas est fixé. Par ailleurs, nous pouvons constater que la variance de l'indicateur possède une tendance à l'augmentation vers la fin du protocole d'usure, entraînant alors de possibles non détections. Il s'agit cependant là de phénomènes localisés à quelques valeurs singulières de  $I_{cour}$ . L'étude de la moyenne de l'indicateur sur dix réalisations permet de statuer clairement sur l'état de santé du roulement en fixant un seuil d'alarme numérique à 200% par exemple. Des résultats complémentaires sont disponibles dans [10].

### 3. DETECTION DE LA DEGRADATION D'UN ROULEMENT A BILLES PAR PERTE DES PROPRIETES LUBRIFIANTES DE LA GRAISSE

Dans cette partie, nous traiterons de la détection de défauts de roulements engendrés par une dégradation des propriétés lubrifiantes de la graisse. Après avoir étudié les propriétés fréquentielles des courants électriques de la machine d'essai en présence de défaillance du roulement testé, nous décrirons la construction d'un indicateur adapté au diagnostic de ce type de défauts.

#### Dispositif expérimental

Le système étudié est un ventilateur haute vitesse dédié à la ventilation cabine des avions. Le ventilateur est entraîné par une machine synchrone triphasée, à aimants permanents avec 3 paires de pôles, alimentée par un onduleur à MLI commandé en courant de manière à obtenir un créneau 120°.

Les acquisitions des courants ont été réalisées avec une carte NI4472, avec une fréquence d'échantillonnage de 50kHz. On dispose de trois machines, la première, utilisée comme référence, est une machine saine, les deux autres sont des machines défaillantes numérotées 116 et 135. Les dégradations des roulements sont réalisées de la manière suivante :

- Pour la machine 116, le roulement graissé est chauffé à 185°C pendant 2 heures et la cage du roulement est fracturée en deux points
- Pour la machine 135, le roulement graissé est chauffé à 200°C pendant 3 heures

Les tests sont effectués avec une vitesse de rotation du ventilateur de 12000tr.min<sup>-1</sup> et une charge aéraulique imposée par un diaphragme en sortie du ventilateur.

#### Contenu fréquentiel naturel des courants statoriques

Considérons tout d'abord un signal créneau 120°. On démontre, par calcul d'une série de Fourier, que ce signal ne comporte que des harmoniques de rang non multiples de 2 et 3 (1, 5, 7, 11, 13, 17, 19...) [15]. De plus, les forces électromotrices statoriques ne comportent pas d'harmoniques multiples de 2. Par ailleurs, du fait d'un couplage étoile à neutre non relié du moteur synchrone triphasé, il ne peut exister d'harmoniques de rang multiple de 3 dans les courants statoriques induits par la force électromotrice. Enfin, la machine étant alimentée par un onduleur MLI, les harmoniques de courant se retrouvent, par modulation de phase, autour de la fréquence de découpage  $f_{dec}$ . Ainsi la famille des harmoniques naturels de courant  $H_s$  s'exprime selon (4), où  $\cup$  représente l'union des ensembles de fréquences.

$$H_s = f_s \cup [(6k \pm 1)f_s] \cup [f_{dec} \pm (6n \pm 1)f_s], \quad k \geq 1, n \geq 0 \quad (4)$$

Ces harmoniques, présents dans les courants statoriques quel que soit l'état des roulements à billes, sont donc considérés comme non porteurs d'informations utiles pour le diagnostic.

#### Effets mécaniques et électriques des défauts de roulements

La dégradation des roulements ne concerne pas ici l'état de surface des chemins de roulements mais plutôt le couple de frottement interne du roulement. Ainsi, nous supposons que la dégradation de la graisse entraîne préférentiellement une augmentation d'énergie des harmoniques de couple mécanique multiples de la fréquence de rotation de la machine  $f_r$ , sous multiple de  $f_s$  (5).

$$f_s = n_p f_r, \text{ avec } n_p = 3, \text{ le nombre de paires de pôles du moteur} \quad (5)$$

Ainsi, en présence du roulement défaillant, des harmoniques de modulations apparaissent autour des harmoniques naturels des courants statoriques [11]. L'ensemble des harmoniques potentiellement présents dans les courants statoriques  $H_d$  s'exprime alors selon (6).

$$H_d = [f_s \pm m f_r] \cup [(6k \pm 1)f_s \pm m f_r] \cup [f_{dec} \pm (6n \pm 1)f_s \pm m f_r], \quad m \geq 1 \quad (6)$$

Les harmoniques sensibles aux défauts présentent une élévation d'énergie entre la machine saine et la machine défaillante. Rappelons que les harmoniques naturels des courants statoriques ne sont pas utiles au diagnostic [16] et que les harmoniques représentatifs du défaut sont ceux dont l'énergie est plus importante dans le cas défaillant que dans le cas sain. Pour les différents types de défaillance, les énergies des harmoniques inclus dans l'ensemble  $F=H_d-H_s$  sont comparées, entre les machines défaillantes et une machine saine de référence, au moyen d'un écart relatif. Comme au chapitre 2, l'énergie spectrale d'un courant est estimée dans des plages fréquentielles centrées autour de chaque harmonique de la famille  $F$  et de largeur 10Hz. De plus, pour s'affranchir de variations des paramètres électromécaniques du ventilateur, ainsi que du point de fonctionnement, les énergies des différents harmoniques sont normalisées par celle du fondamental d'alimentation.

Pour définir l'ensemble des harmoniques utiles au diagnostic des différents défauts, seuls sont retenus les harmoniques présentant un écart d'énergie positif pour les deux machines défaillantes par rapport à la machine saine de référence. L'ensemble ainsi isolé est donc un sous-ensemble de  $F$ . Cette recherche d'un ensemble cohérent est réitérée pour plusieurs enregistrements de courant électrique et plusieurs charges aérauliques appliquées

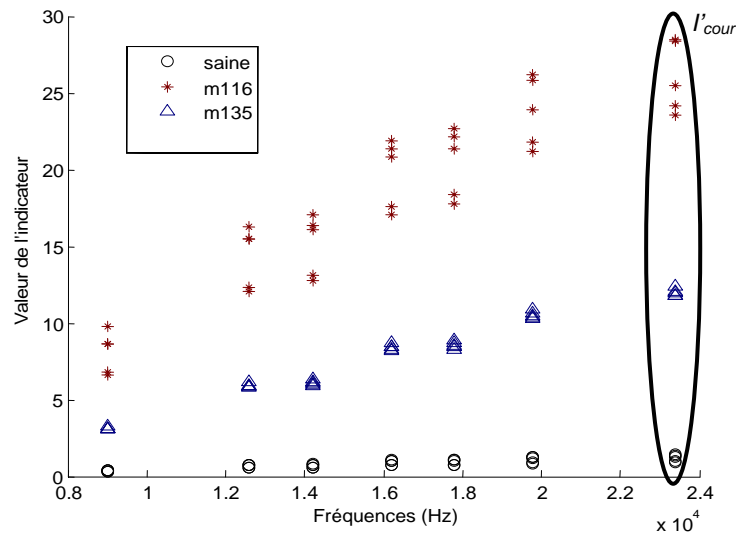


au ventilateur [17]. Ainsi, l'ensemble sélectionné pour la détection des défauts de roulements  $F_d$ , est construit de manière robuste vis-à-vis de variations du point de fonctionnement.

#### Construction de l'indicateur de défauts de roulements et résultats expérimentaux

Une fois l'ensemble fréquentiel  $F_d$  isolé, l'indicateur de défaillance des roulements à billes est construit à partir de l'énergie des harmoniques de l'ensemble  $F_d$ , normalisée par l'énergie du fondamental à la fréquence  $f_s$ , afin de s'affranchir des variations de la charge aéraulique. Une somme cumulée des énergies est calculée. Seule la dernière valeur de la somme cumulée sera considérée pour obtenir un indicateur numérique  $I'_{cour}$ .

L'indicateur ainsi défini est appliqué à une machine saine ainsi qu'aux deux machines défailtantes. La figure 4 montre les sommes cumulées, correspondant au calcul de l'indicateur, pour une machine saine, la machine 116 et la machine 135. La vitesse de rotation du ventilateur est ici fixée à  $12000tr.min^{-1}$ , la fréquence fondamentale statorique  $f_s$  est alors de  $600Hz$ . Cinq signaux de courant d'une durée de  $4s$  sont enregistrés afin d'obtenir 5 valeurs d'indicateur dans chaque cas. Les fréquences indiquées en abscisse de la figure 4 correspondent aux fréquences des harmoniques de l'ensemble  $F_d$ .



**Fig. 4** Sommes cumulées pour le calcul de  $I'_{cour}$  pour différentes machines et dégradations  
Cumulative sums for the computation of  $I'_{cour}$  for several machines and defects

Le tableau 2 permet de synthétiser les résultats en indiquant la moyenne  $M$  et l'écart type  $\sigma$  de  $I'_{cour}$  pour les différentes machines.

	Machine saine	Machine 135	Machine 116
Moyenne $M$	1.22	12.06	25.98
Ecart type $\sigma$	0.23	0.28	2.04

**Tab. 2** Caractéristiques statistiques de  $I'_{cour}$   
Statistical characteristics of  $I'_{cour}$

On peut clairement voir en figure 4 et dans le tableau 2 que l'indicateur réagit à la présence des défauts de roulements par une augmentation significative de sa moyenne entre le cas sain et les cas défailtants. De plus, les écarts types de  $I'_{cour}$  permettent de

statuer clairement sur l'état de santé du roulement équipant la machine testée. Par ailleurs, considérant que le roulement de la machine 116 est plus fortement dégradé que celui de la machine 135, on remarque également que l'indicateur permet de classer la sévérité de la dégradation.

Dans ce cas de dégradation, l'exploitation des harmoniques de courant théoriquement non porteurs d'énergie, est tout à fait pertinente. De plus, on montre expérimentalement que la sélection d'un ensemble réduit d'harmoniques permet de séparer correctement une machine équipée de roulements sains, d'une machine équipée de roulements dégradés.

#### 4. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une alternative à la détection des défaillances des roulements à billes par analyse vibratoire. Nous avons alors montré qu'il était possible, au moyen d'un schéma de détection adapté, de statuer, dans différents systèmes électromécaniques, sur l'état de santé des roulements à billes. De plus, nous avons considéré deux types de défaillances : une usure des surfaces de contact par contamination et une dégradation des propriétés lubrifiantes de la graisse par chauffage.

Nous avons montré que la mesure des courants statoriques des machines électriques, souvent disponibles pour des applications de contrôle-commande, permettait également de définir des schémas de détection simples. Ceux-ci, basés sur l'extraction d'énergie spectrale dans des bandes de fréquences adaptées au type de machine et au type de dégradation, permettent de détecter et/ou de suivre la dégradation des roulements à billes. Les résultats expérimentaux montrent une bonne qualité de détection des défauts de roulements par un indicateur scalaire, aussi bien en termes de séparation des roulements sains avec les roulements défaillants, qu'en termes de robustesse et de reproductibilité des résultats.

Il est cependant nécessaire de tester l'indicateur défini au chapitre 3 pour une usure graduelle des roulements à billes.

#### Note

Ce travail est en partie financé par le projet PREMEP, projet de recherche collaboratif associant Technofan, Liebherr Aerospace Toulouse, LAPLACE, CIRTEM, Ateliers de Navarre et DELTY, et labellisé par le pôle Aerospace Valley.

#### 5. RÉFÉRENCES

- [1] Bigret R., Féron J. L., Pachaud C., *Diagnostic, maintenance, disponibilité des machines tournantes - modèles, mesures, analyses des vibrations*, Masson, Paris, 1995.
- [2] IEEE Motor reliability working group, « Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part I », *IEEE – Trans. on Industry Applications*, IA-21 (4) (1985), 853-864.
- [3] IEEE Motor reliability working group, « Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part II », *IEEE – Trans. on Industry Applications*, IA-21 (4) (1985), 865-872.
- [4] McInerny S. A., Dai Y., « Basic vibration signal processing for bearing fault detection », *IEEE – Trans. on Education*, 46 (1) (2003), 149-156.
- [5] Blödt M., Granjon P., Raison B., Rostaing G., « Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring », *IEEE – Trans. on Industrial Electronics*, 55 (4), (2008), 1813-1822.
- [6] Mitchell D.J., Mecholsky J.J. Jr., Adair J.H., « All-steel and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-steel hybrid rolling contact fatigue under contaminated conditions », *Wear*, 239 (2) (2000) 176-188.
- [7] Harris T.A., *Rolling bearing analysis*, Wiley, New-York, 1991.

- [8] Trajin B., Régnier J., Faucher J., « Comparison between vibration and stator current analysis for the detection of bearing faults in asynchronous drives », *IET – Electric Power Applications*, 4 (2) (2010) 90-100.
- [9] Trajin B., Régnier J., Faucher J., « Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis », *Conference on Power Electronics Machine and Drives Conference*, 3<sup>ème</sup> édition, IET, 592-596, 2008.
- [10] Trajin B., *Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones – Application à la surveillance des roulements à billes*, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2009.
- [11] Blödt M., Chabert M., Régnier J., Faucher J., « Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-frequency Analysis », *IEEE – Trans. on Industry Applications*, 42 (6) (2006), 1454-1463.
- [12] Trajin B., Régnier J., Faucher J., « Indicator for bearing fault detection in asynchronous motors using stator current spectral analysis », *International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE IES, 570-575, 2008.
- [13] Nandi S., Ahmed S., Toliyat H. A., « Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages », *IEEE – Trans. on Energy Conversion*, 16 (3) (2001), 253-260.
- [14] Trajin B., Régnier J., Faucher J., « Comparison between stator current and estimated mechanical speed for the detection of bearing wear in asynchronous drives », *IEEE – Trans. on Industrial Electronics*, 56 (11) (2009) 4700-4709.
- [15] Kahane J. P., Lemarié-Rieusset P. G., *Série de Fourier et ondelettes*, Cassini, Cambridge, 1998.
- [16] Zhou W., Habetler T. G., Harley R. G., « Stator current-based bearing fault detection techniques : a general review », *International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, IEEE, 7-10, 2007.
- [17] Z. Obeid, « Algorithmes de surveillance et de détection de dégradations des roulements sur les actionneurs synchrones embarqués », *Journée annuelle de l'école doctorale GEET*, 2010.